

中華民國經濟部智慧財產局

INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE
MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS
REPUBLIC OF CHINA

茲證明所附文件，係本局存檔中原申請案的副本，正確無訛，
其申請資料如下：

This is to certify that annexed is a true copy from the records of this
office of the application as originally filed which is identified hereunder:

申請日：西元 2003 年 06 月 20 日
Application Date

申請案號：092116753
Application No.

申請人：國立臺灣大學
Applicant(s)

局長
Director General

蔡練生

發文日期：西元 2003 年 9 月 16 日
Issue Date

發文字號：09220935420
Serial No.

發 明 專 利 說 明 書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※ 申請案號：

※ 申請日期：92/06/20

※IPC 分類：

壹、發明名稱：(中文/英文)

利用縮短侷限異質結構增加半導體光電元件發光頻寬之方法

貳、申請人：(共1人)

姓名或名稱：國立臺灣大學 (中文/英文)

代表人：陳 維 昭 (中文/英文)

住居所或營業所地址：臺北市羅斯福路四段1號 (中文/英文)

國 籍：中 華 民 國 (中文/英文)

參、發明人：(共1人)

姓 名：林 清 富 (中文/英文)

住居所地址：臺北市羅斯福路四段1號 (中文/英文)

國 籍：中 華 民 國 (中文/英文)

肆、聲明事項：

☐ 本案係符合專利法第二十條第一項☐第一款但書或☐第二款但書規定之期間，其日期為： 年 月 日。

◎本案申請前已向下列國家（地區）申請專利 ☐ 主張國際優先權：

【格式請依：受理國家（地區）；申請日；申請案號數 順序註記】

1.

2.

3.

4.

5.

☐ 主張國內優先權（專利法第二十五條之一）：

【格式請依：申請日；申請案號數 順序註記】

1.

2.

☐ 主張專利法第二十六條微生物：

☐ 國內微生物 【格式請依：寄存機構；日期；號碼 順序註記】

☐ 國外微生物 【格式請依：寄存國名；機構；日期；號碼 順序註記】

☐ 熟習該項技術者易於獲得，不須寄存。

伍、中文發明摘要：

本發明係揭露一種利用縮短侷限異質結構增加半導體光電元件發光頻寬之方法，此方法係利用較短寬度之分離侷限異質結構（SCH）區域，以縮短電洞穿越此區域的時間，使電洞和電子進入量子井的時間差異變小，而達到較均勻的載體分佈，讓各個量子井皆獲得載體而提供發光增益，使半導體光電元件的發光頻寬增加。若是將此技術應用在可調波長半導體雷射之製作上，可使同一半導體雷射元件的波長可調變幅度變寬，對於光通訊系統的測試極為方便，也可直接應用於系統中，用以取代其他多樣性的元件，降低系統整合所需之成本者。

陸、英文發明摘要：

柒、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第（四）圖。

(二)本代表圖之元件代表符號簡單說明：

10 量子井

12 量子井

14 位障

18 SCH 區域

捌、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

玖、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明係有關一種半導體光電元件之發光頻寬技術，特別是關於一種利用縮短分離侷限異質結構（Separate Confinement Heterostructure，SCH）以增加半導體光電元件之發光頻寬的方法。

【先前技術】

隨著網路時代的興起，有關於光纖網路中不可或缺的部分，如傳送端、接收端、交換端等，都成為現今研究的重點。由於半導體光電元件具有積體相當輕薄短小，能發出高功率、高調變速率和高穩定度（包括對溫度及操作時間的穩定度）的光訊號，以及高可靠度等優點，使其在光纖通訊中成為必須的成員。

舉例來說，半導體光放大器（Semiconductor Optical Amplifier，下稱 SOA）或高功率二極體（superluminescent diode，下稱 SLD）在中繼光訊號放大及光開關方面的功能也被採用，但傳統的半導體光放大器只有約 40 nm 的頻寬，對於寬頻的光纖通訊而言並不合乎需求。另一方面，雖然摻鉕光纖放大器（Er-doped fiber amplifier，下稱 EDFA）目前普遍應用在光通訊系統中，做為中繼光訊號放大的用途，但因其可用的頻寬仍然有限，侷限在 C-band 和 L-band 頻域之間（1525~1605 nm），使得光纖的另一重要頻帶在 1300 nm 附近完全無法藉由摻鉕光纖放大器加以放大，使未來光通訊系統無法繼續依賴摻鉕光纖放大器。

請參閱第一圖，其係為現今光纖之吸收頻譜圖，如圖所示，在此吸收頻譜圖上，其較低的實線係為在光纖核心（core）摻雜 4% 二氧化鉍（ GeO_2 ）的單模（single Mode）光纖，上方虛線係為多模（Multi Mode）光纖，另在 1400 nm 附近的峰值係因水分子存在於光纖玻璃中所造成的，而其氫氧鍵結的共振波長在 1385 nm，此吸收波峰在 2000 年時也被 Lucent Technology 的新技術消除，所以光纖可以提供從 1250 nm 到

1650nm 的大範圍低損耗波段。

由於現今光纖製作技術的日益精進，可供通訊之波長範圍越來越寬，使光通訊的可用頻帶涵蓋 1200 nm~1650 nm。然而，摻鉍光纖放大器雖然與光纖的耦合效率較高，但是其增益頻寬有限，故在 C-band 與 L-band 的波長範圍內，即需要不同增益頻寬之摻鉍光纖放大器元件，且其所需的庫存與製作成本皆高，被視為一項在波長區段多工（WDM）系統中的主要缺點之一，且在 1300 nm 附近的頻帶根本無法使用任何摻鉍光纖放大器元件。因此，以半導體光放大器作為光纖通訊系統中的中繼器，最好其頻寬在光通訊波長範圍 1250 nm~1650 nm 內皆具有良好且接近的增益。但習用的半導體光放大器只有約 40 nm 的頻寬，對頻寬的光纖通訊而言並不合乎需求。

再者，半導體量子井雷射相關元件之特性，係包含臨界電流密度低、溫度敏感性低、增益頻寬較寬等，都較實體半導體雷射元件好。此乃因量子井的磊晶層極薄，現今不論商用或研究用的半導體雷射，亦不論波長之範圍，皆以金屬有機氣相磊晶（Metal Organic Chemical Deposition，下稱 MOCVD）或分子束磊晶（Molecular Beam Epitaxy）成長的半導體量子井（Semiconductor Quantum Well）加以半導體製程之製造而成。

但就目前的研究報告指出，由電流注入所激發的載子，在多層量子井中分佈的並不均勻，故若要增加半導體光放大器的增益頻寬（亦即發光頻寬），必須將載子分佈不均勻的特性加以考慮。在此之前，也曾有人研究使用非對稱多層量子井的技術來增加頻寬，但從未考慮載子分佈不均勻的特性，所以成果都相當的有限。

因此，有鑑於上述中繼光訊號放大器之缺失，本發明即在提出一種增加半導體光電元件發光頻寬之方法，其係利用不同寬度的多層量子井，使其量子井的能階恰好能銜接，再考慮多層量子井內載子分佈不均勻的特性，利用寬度縮短的分離侷限異質結構（SCH）區域，可使量子井內載子的分佈較為均勻，以得到超寬的發光頻寬，使半導體光放

大器的頻帶可涵蓋 1250 nm~1650 nm 之超大頻寬。

【發明內容】

本發明之主要目的係在提供一種增加半導體光電元件發光頻寬之方法，其係利用較短寬度之分離侷限異質結構 (SCH) 區域，縮短電洞穿越此區域的時間，令電洞與電子進入量子井的時間差異變小，使量子井內載子的分佈較為均勻，以達到更寬的增益頻寬，進而使半導體光電元件的發光頻寬增加。

本發明之另一目的係在提供一種利用縮短侷限異質結構增加半導體光電元件發光頻寬之方法，其係可達到更寬的發光頻寬以及較低的操作電流。

本發明之再一目的係在提供一種利用縮短侷限異質結構增加半導體光電元件發光頻寬之方法，其係配合不同寬度多層量子井增加半導體光電元件之發光頻寬技術，使量子井內控制載子二維分佈的優勢載子為電子或電洞，以達到更寬的增益頻寬或更好的溫度特性者。

為達到上述之目的，本發明係控制不同分離侷限異質結構 (SCH) 區域的寬度，製作出由電子或電洞控制二維載子分佈不同寬度的多層量子井結構；並配合電洞的移動速度而縮短分離侷限異質結構區域的寬度，使該電洞移入量子井的時間近似於電子被捕捉入量子井的時間，以滿足 $|\text{電洞移入量子井的時間}(\tau_{p,diffusion}) - \text{電子被捕捉入量子井內時間}(\tau_{n,cap})| < 1$ 微微秒的關係式。

藉由上述之技術，可製作出半導體光放大器/高功率二極體/雷射等半導體光電元件，且具有寬頻、較佳的溫度及較好的調變等特性，並可將雷射可調變的波長幅度擴充的非常寬，對於光通訊系統的測試極為方便，也可直接應用於系統中，用以取代其他多樣性的元件，降低系統整合所需的成本。

底下藉由具體實施例配合所附的圖式詳加說明，當更容易瞭解本發明之目的、技術內容、特點及其所達成之功效。

【實施方式】

就半導體光電元件而言，以半導體光放大器作為光纖通訊系統中的中繼器，最好其頻寬在光通訊波長範圍 1250 nm~1650 nm 之間皆具有良好且接近的增益。但是習知的半導體光放大器只有約 40 nm 左右的頻寬，對寬頻的光纖通訊而言並不合乎需求。

另，就相關的研究結果可明顯得知，在目前被廣泛應用在光通訊系統中的相關元件，其載子在多層量子井內的分佈相當不均勻，且會隨量子井的結構、排列順序及材料的不同而產生極大的差異，使得設計時需多考慮此項變數。所以，在此本發明先針對超寬頻的不同寬度多層量子井結構所需考慮之因素加以詳細說明，然後再針對分離侷限異質結構之寬度詳加敘述於後。

對於欲設計超寬頻的不同寬度多層量子井結構可由以下各點加以綜合考慮：

一、同寬度量子井的能階：係可將欲發光之波長，利用不同寬度的多層量子井的堆疊，來達到設計寬頻結構之目的。但須將下列情況列入考慮之中：

a、若這些不同寬度量子井的井底及位障材料相同，由量子力學之計算得知較寬的量子井，其量子化能階較低、發光波長較長；而較窄之量子井，其量子化能階較高、發光波長較短。由增益頻譜的詳細計算中指出，欲達到相同的增益，其較寬的量子井所需的載子濃度較低，但這是會影響最終的發光頻譜。

b、若使用不同材料組成的量子井底或位障，則設計的自由度增加，係可利用不同材料組成的不同寬度多層量子井，設計其發光波長不同但是其量子化能階相近，頻寬可有效增寬，且在增益大於零之處，其增益值相當一致。

c、考慮較高能階的量子井所發出之光能量較高，會被較低能階的量子井再度吸收，故設計多層不同寬度量子井的數目時，較高能量的量子井數目應該較多，但詳細的情況必須經由增益頻譜的計算確切的量子井數目後才能決定。

二、分離侷限異質結構 (SCH) 的長度：在半導體量子井結構中，電流注入所激發的電子電洞對，分別由 P 接點與 N 接點注入，經由分離侷限異質結構進入主動區域並結合發光，所以載子在 SCH 區域中移動的速度決定了其控制量子井內二維載子分佈的能力。

a、若電子較快進入量子井內，則電子為控制量子井內二維載子的優勢載子。最終的二維載子分佈將依據電子的空間分佈（電子由 N 接點注入，必然在靠 N 接點處的電子濃度會較高）並根據電荷中性的原則做出對應的分佈，電洞為優勢載子的情況亦然。利用以下簡單的模型可以判斷何種載子為優勢載子：

$$\tau_{LF} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p} + \tau_{cap,n} = \frac{d_p^2}{4D_p} + \frac{d_n^2}{4D_n} + \frac{d_p \tau_{cp}}{W} + \frac{d_n \tau_{cn}}{W} \quad (1)$$

在上述公式(1)中， $d_p(d_n)$ 代表電洞（電子）要擴散到量子井所需移動的距離（即 SCH 區域的長度）， D_p 與 D_n 為材料的擴散係數， W 是量子井的寬度， $d_p \tau_{cp}$ 和 $d_n \tau_{cn}$ 是根據量子力學所得到之捕捉時間，故等號右邊的四項時間分別係為：電洞在 SCH 區域中之擴散時間、電子在 SCH 區域中之擴散時間、電洞被量子井捕捉的等效時間以及電子被量子井捕捉的等效時間；且為了考慮未被量子井捕捉的載子堆積在 SCH 區域中而使得擴散時間加長，

所以必須注意載子的等效捕捉時間為：量子力學所計算出的捕捉時間乘上一體積比 $d_p(d_n)/W$ 。

b、將上述式(1)中的電洞部份時間（電洞擴散+電洞等效捕捉時間）定義為電洞由注入 SCH 區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{p,total} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{cap,p}$ ；與電子由注入 SCH 區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{n,total} = \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p}$ （電子擴散+電子等效捕捉時間）相比較。當 $\tau_{p,total} > \tau_{n,total}$ 時，則電子會較快進入量子井二維能階，而形成靠近 N 型半導體側（N-side）處具有較高的電子濃度，而後進入量子井二維能階的電洞會大致依據電子的分佈而做出類似的分佈，故二維載子濃度在靠近 N 型半導體側的量子井較高；相反的當 $\tau_{n,total} > \tau_{p,total}$ 時，則電洞會較快進入量子井二維能階，而形成靠近 P 型半導體側（P-side）處具有較高的電洞濃度，而後進入量子井二維能階的電子，會大致依照電洞的分佈而做出類似的分佈，故二維載子濃度在靠近 P 型半導體側的量子井較高；在兩者相較之下，若電洞為優勢載子，其較重的等效質量使得其對溫度的敏感性較低，故溫度特性較好；若電子為優勢載子，其載子在量子井內的分佈會較均勻，故其頻寬會更寬。

c、載子在量子井內分佈之均勻度：即載子被量子井捕捉的速率，也就是量子井捕捉載子的能力與量子井的二維能階密度有關；量子井的二維能階密度越高，其捕捉載子的能力就越強，再配合上述

優勢載子的決定，就會影響載子在不同寬度多層量子井內的分佈情形。若欲得到更寬的發光頻譜，就要使載子能均勻的分佈在所設計的多層不同寬度量子井中，但如此卻會犧牲一些此類元件的發光特性，如發光效率。

d、有下列因素係會影響載子在量子井內分佈的均勻度：

- 1、量子井底及位障的材料組成，量子井寬度與多層不同寬度量子井之順序；根據分析，材料組成會經由二維與三維能階密度關係，影響量子井侷限載子的能力，而影響最終二維載子的分佈（包括優勢載子的選擇）。而量子井的寬度會影響量子井的二維能階密度，進而影響其載子分佈及載子分佈的均勻性；且若有不同材料、不同寬度的量子井，便可以多層不同寬度量子井的順序，再配合優勢載子的決定來影響量子井捕捉載子的能力，進而影響載子分佈的均勻性。

第二圖係為量子井之能量與能階密度關係圖，請參閱此圖式所示，不同的拋物線代表不同的材料，也就是不同的三維能階密度，量子井之能階成步階函數的形狀； $3D$ 與 $3D'$ 為不同材料，而 $E1$ 與 $E1'$ 為不同量子井寬度，若設計的量子井量化能階差不多，則二維能階密度的差別主要來自實體材料組成時之差異；且能階密度會影響量子井捕捉載子的能力，所以會影響二維載子分佈的均勻性，由此可知，二維能階密度與量子井寬度、量子井之材料組成有極大的關係，在設計時需詳加考慮。

- 2、位障的寬度及高度：在多層量子井結構內，量子井間的位障愈寬，其多層量子井間的載子分佈愈均勻，而量子井位障的高度

愈低，其量子井內的二維載子分佈也就愈均勻。

3、分離侷限異質結構 (SCH) 區域的寬度：由於電子的移動速度比電洞快許多，因此電子可以很快擴散至量子井區，一般而言，電子的擴散係數約為電洞的 30 倍，雖然電洞可以較快被捕捉到量子井內，但在其到達量子井區前，捕捉動作不可能發生。若要讓電子及電洞約同時進入量子井內，就要讓電洞到達量子井區的時間不能落後電子太多，因此 SCH 區域的寬度有很大的影響。簡而言之，(電子擴散時間+電子捕捉時間) 必須大約等於 (電洞擴散時間+電洞捕捉時間)。雖然電洞捕捉時間比電子捕捉時間短，但兩者差異約在 2 微微秒 (ps) 內。如果 SCH 區域的寬度太大，電洞可能比電子晚 10 ps 到達量子井區，即使電洞被捕捉到量子井內的時間很快 (可以小於 1 ps)，但 (電洞擴散時間+電洞捕捉時間) 仍遠大於 (電子擴散時間+電子捕捉時間)，使得電子成為優勢載子，致使載子分佈不均勻。因此，SCH 區域的寬度必須適當選擇，令 (電子擴散時間+電子捕捉時間) \approx (電洞擴散時間+電洞捕捉時間)。

4、摻雜擴散的影響：將半導體摻雜成 p 型時，此些摻雜的離子容易擴散，可能在長晶過程或製程中滲入量子井區域內，因而降低了靠近 P 型半導體側之量子井所能提供的增益，因此也需防止摻雜離子擴散的不好影響。

由於影響超寬頻的半導體光電元件之因素相當多，而本發明係在揭露一種利用不同分離侷限異質結構 (SCH) 區域的寬度，配合不同寬度

多層量子井結構來增加半導體光電元件的發光頻寬技術。

本發明之方法主要係在於：以控制不同分離侷限異質結構（SCH）區域的寬度，製作出由電子或電洞控制二維載子分佈不同寬度的多層量子井結構；並配合電洞的移動速度而縮短 SCH 區域的寬度，使電洞移入量子井的時間近似於電子被捕捉入該量子井的時間，其關係係滿足下列關係式： $|\text{電洞移入量子井的時間}(\tau_{p,diffusion}) - \text{電子被捕捉入量子井內時間}(\tau_{n,cap})| < 1$ 微微秒。其中，控制不同 SCH 區域之寬度係為使電洞到達量子井的時間不超過 5 ps；且不同寬度的多層量子井結構之能階係可將欲發光之波長，以不同寬度的多層量子井之堆疊而組成者。

其中，該半導體光電元件係為半導體光放大器、高功率二極體、雷射等光電元件，且適用於光通訊系統發光頻寬之三五族者。上述之不同分離侷限異質結構的半導體係由三五族元素所組合，並可包含兩種或以上的元素成份；且該多層量子井結構組成的半導體材質係由二六族元素組成、第四族元素組成、第四族和三五族元素組成、第四族和第二六族元素組成、第三五族和第二六族元素組成或是由第四族、三五族和二六族所組成，並可包含兩種或以上的元素成份。

在上述控制不同 SCH 區域的寬度時，在靠近 P 型半導體側的 SCH 區域寬度，係為使電洞到達量子井的時間不超過 5 ps；而在靠近 N 型半導體側的該 SCH 區域寬度係比靠近 P 型半導體側的寬度大，係為使電洞到達量子井的時間比電子到達量子井的時間相差不超過 3 ps。其中，在靠近 P 型半導體側的 SCH 區域係包含一極薄的 N 型半導體，此 N 型半導體的寬度不超過 5 奈米，以阻止該 P 型半導體的摻雜離子滲入該量子井內。

另外，在本發明製作出的半導體光電元件中，亦可利用前述公式(1)的方程式判斷電子或電洞為優勢載子。當（電洞由注入分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{p,total} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{cap,p}$ ）<（電子由注入分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維

能階的時間 $\tau_{n,total} = \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p}$) 時，即表示電洞為優勢載子，其較重的等效質量使得其對溫度的敏感性較低且溫度特性較好；而當(電洞由注入分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{p,total} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{cap,p}$) > (電子由注入分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{n,total} = \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p}$) 時，即表示電子為優勢載子，其載子在量子井內的分佈會較均勻，使頻寬會更寬。

為了確認分離侷限異質結構 (SCH) 區域寬度之影響，藉由上述原則設計出半導體光放大器/高功率二極體的磊晶結構示意圖，如第三圖及第四圖所示，其係以兩種不同材料、不同寬度量子井的設計，該兩種量子井 10、12 材料分別為 $\text{In}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{As}_{0.72}\text{P}_{0.28}$ 以及 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，且預計其發光分別在 1.3 微米 (μm) 及 1.6 微米；位障 14 材料為 $\text{In}_{0.86}\text{Ga}_{0.14}\text{As}_{0.3}\text{P}_{0.7}$ 。其中，第三圖所示之 SCH 區域 16 寬度為 120 nm，代號為 A1；第四圖所示之 SCH 區域 18 寬度為 30 nm，代號為 A4。

第三圖所示之 A1 半導體光放大器/高功率二極體在不同的電流導通下，透過發光頻譜可以看到 1.3 微米及 1.6 微米的逐漸發光，如第五圖所示，其範圍涵蓋了從 1.3 微米及 1.6 微米之區域，甚至跨越了此範圍。

第四圖所示之 A4 半導體光放大器/高功率二極體在不同的電流導通下，透過發光頻譜可以看到 1.3 微米及 1.6 微米的位置逐漸發光，如第六圖所示，其範圍係涵蓋了從 1.3 微米及 1.6 微米之區域，甚至跨越了此範圍。

比較 A1 和 A4 兩種半導體光放大器/高功率二極體之磊晶結構，A4 在較小電流時就能有較寬的頻寬。如第七圖所示，其係 A1 和 A4 之頻譜半高寬 (FWHM) 的頻寬對注入電流的變化。A1 必須在電流將近 800 mA 時，其 FWHM 頻寬才接近 300 nm，而 A4 在 50 mA 的注入電流下，其 FWHM 頻寬就超過 A1 在電流 800 mA 的頻寬；A4 在注入電流大於或等於 100 mA 時，其 FWHM 頻寬更超過 300 nm，遠超過目前習知做法能達到的頻寬。

因此，本發明係使用寬度縮短的分離侷限異質結構區域，使量子井內載子的分佈較為均勻，以達到更寬的增益頻寬以及較低的操作電流。

綜上所述，誠可見本發明針對半導體光電元件之發光頻寬技術，係可利用不同寬度多層量子井以及控制分離侷限異質結構(SCH)區域寬度而達到，並能充分發揮其預期之功效。

以上所述之實施例僅係為說明本發明之技術思想及特點，其目的在使熟習此項技藝之人士能夠瞭解本發明之內容並據以實施，當不能以之限定本發明之專利範圍，即大凡依本發明所揭示之精神所作之均等變化或修飾，仍應涵蓋在本發明之專利範圍內。

【圖式簡單說明】

第一圖為習知光纖之吸收頻譜圖。

第二圖為量子井之能量與能階密度關係圖。

第三圖為 A1 之半導體光放大器/高功率二極體的磊晶結構示意圖。

第四圖為 A4 之半導體光放大器/高功率二極體的磊晶結構示意圖。

第五圖為 A1 之半導體光放大器/高功率二極體在不同電流下之發光頻譜。

第六圖為 A4 之半導體光放大器/高功率二極體在不同電流下之發光頻譜。

第七圖為 A1 和 A4 的發光頻寬對注入電流的關係圖。

【圖號簡單說明】

10 量子井

12 量子井

14 位障

16 SCH 區域

18 SCH 區域

拾、申請專利範圍：

- 1、一種利用縮短侷限異質結構增加半導體光電元件發光頻寬之方法，其係控制不同分離侷限異質結構（SCH）區域的寬度，製作出由電子或電洞控制二維載子分佈不同寬度的多層量子井結構；並配合電洞的移動速度而縮短該分離侷限異質結構區域的寬度，使該電洞移入該量子井的時間近似於電子被捕捉入該量子井的時間。
- 2、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，該電洞移入量子井的時間與該電子被捕捉入量子井的時間之關係係滿足下列關係式： $|\text{電洞移入量子井的時間}(\tau_{p,diffusion}) - \text{電子被捕捉入量子井內時間}(\tau_{n,cap})| < 1$ 微微秒。
- 3、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，利用不同該分離侷限異質結構區域之寬度係為使該電洞到達該量子井的時間不超過 5 微微秒。
- 4、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，該不同寬度的多層量子井結構之能階係可將欲發光之波長，以不同寬度的多層量子井之堆疊而成。
- 5、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，在該控制不同分離侷限異質結構區域的寬度時，在靠近 P 型半導體側的該分離侷限異質結構區域寬度，係為使該電洞到達量子井的時間不超過 5 微微秒。
- 6、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，在該控制不同分離侷限異質結構區域的寬度時，在靠近 N 型半導體側的該分離侷限異質結構區域寬度比靠近 P 型半導體側的寬度大，係為使該電洞到達量子井的時間比該電子到達量子井的時間相差不超過 3 微微秒。
- 7、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，在靠近 P 型半導體側的該分離侷限異質結構係包含一極薄的 N 型半導體，該 N 型半導體的寬度不超過 5 奈米，以阻止該 P 型半導體的摻雜離子滲入該量子井內。
- 8、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，在該不同寬度的多層量子井結構中，係利用以下簡單的模型來判斷何種載子為優勢載子：

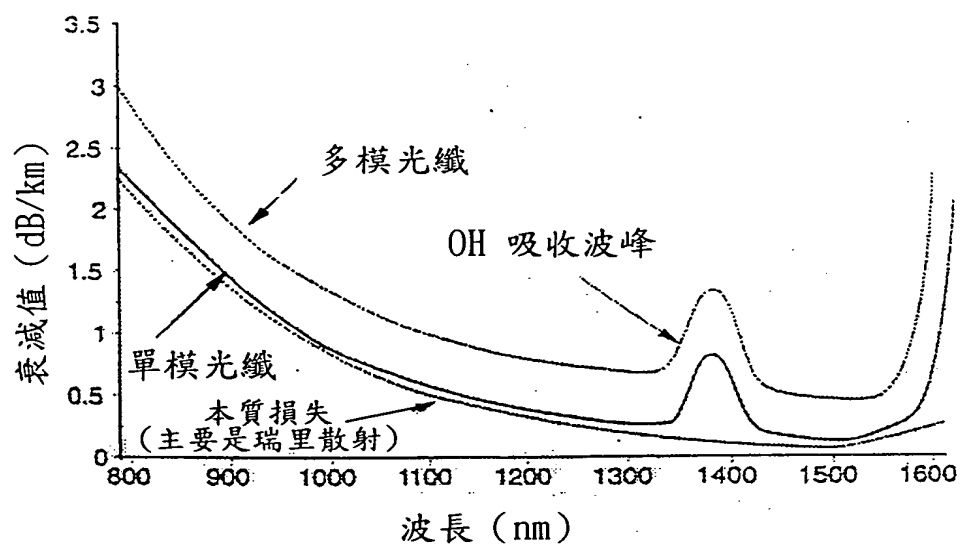
$$\tau_{LF} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p} + \tau_{cap,n} = \frac{d_p^2}{4D_p} + \frac{d_n^2}{4D_n} + \frac{d_p \tau_{cp}}{W} + \frac{d_n \tau_{cn}}{W}$$

式子中 $d_p(d_n)$ 代表電洞（電子）要擴散到量子井所需移動的距離（即該分離侷限異質結構區域的長度）， D_p 與 D_n 為材料的擴散係數， W 是量子井的寬度， $d_p \tau_{cp}$ 和 $d_n \tau_{cn}$ 是根據量子力學所得到之捕捉時間，故等號右邊的四項時間分別係為：電洞在該分離侷限異質結構區域中之擴散時間、電子在該分離侷限異質結構區域中之擴散時間、電洞被量子井捕捉的等效時間以及電子被量子井捕捉的等效時間；以及為了考慮未被量子井捕捉的載子堆積在該分離侷限異質結構區域中，使得擴散時間加長，必須注意載子的等效捕捉時間為：量子力學所計算出的捕捉時間乘上一體積比 $d_p(d_n)/W$ 。

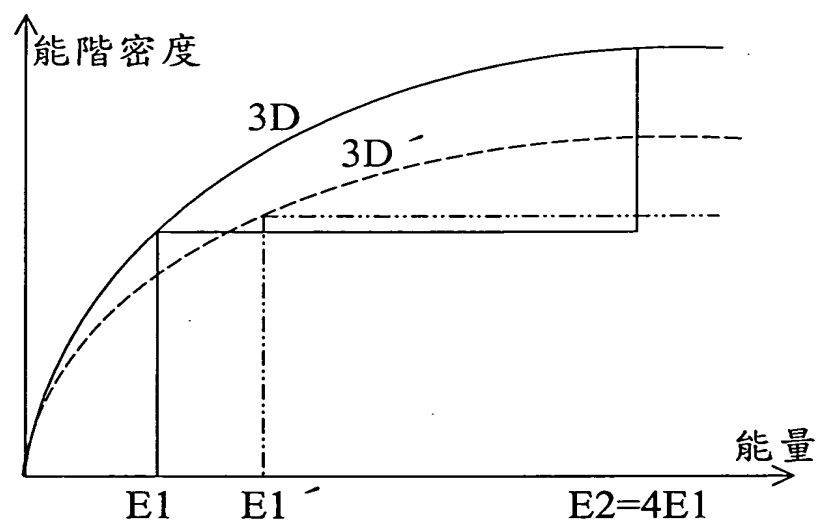
- 9、如申請專利範圍第 8 項所述之方法，其中，將該式子中的電洞部份時間（電洞擴散＋電洞等效捕捉時間）係設為電洞由注入該分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{p,total} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{cap,p}$ ，與電子由注入該分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{n,total} = \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p}$ （電子擴散＋電子等效捕捉時間）相比較。
- 10、如申請專利範圍第 9 項所述之方法，其中，若該 $\tau_{p,total} > \tau_{n,total}$ ，則該電子會較快進入量子井二維能階，而形成靠近 N 型半導體側具有較高的電子濃度，而後進入量子井二維能階的電洞會大致依據該電子的分佈而做出類似的分佈，使二維載子濃度在靠近 N 型半導體側的量子井較高。
- 11、如申請專利範圍第 9 項所述之方法，其中，若該 $\tau_{n,total} > \tau_{p,total}$ ，則該電洞會較快進入量子井二維能階，而形成靠近 P 型半導體側具有較高的電洞濃度，而後進入量子井二維能階的電子會大致依據該電洞的分佈而做出類似的分佈，使二維載子濃度在靠近 P 型半導體側的量子井較高。
- 12、如申請專利範圍第 9 項所述之方法，其中當（該電洞由注入分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{p,total} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{cap,p}$ ）<（該電子由注入分離侷限異質結構區域到被量子井捕捉進

入二維能階的時間 $\tau_{n,total} = \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p}$) 時，即表示該電洞為優勢載子，其較重的等效質量使得其對溫度的敏感性較低且溫度特性較好。

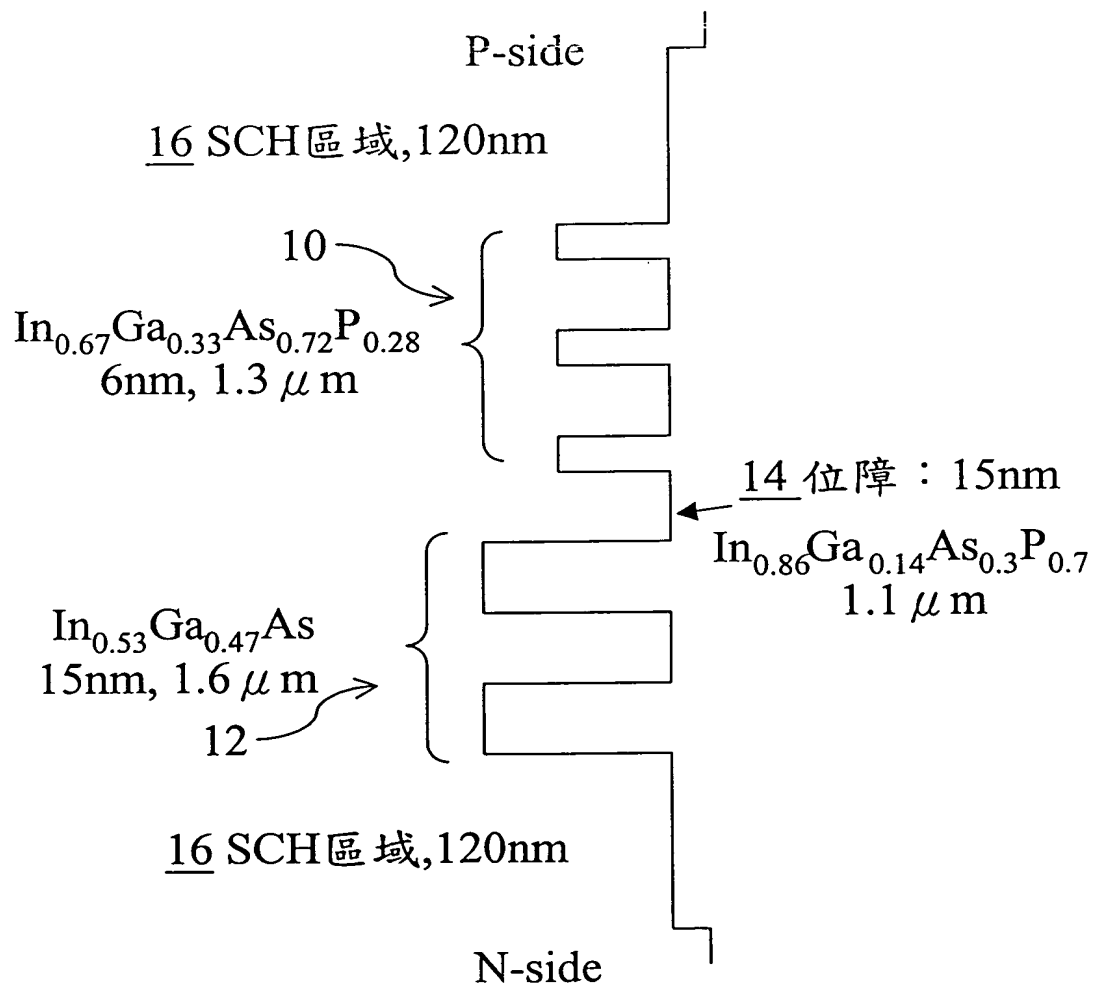
- 13、如申請專利範圍第 9 項所述之方法，其中，當 (該電洞由注入分離局限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{p,total} = \tau_{p,diffusion} + \tau_{cap,p}$) > (電子由注入分離局限異質結構區域到被量子井捕捉進入二維能階的時間 $\tau_{n,total} = \tau_{n,diffusion} + \tau_{cap,p}$) 時，即表示該電子為優勢載子，其載子在量子井內的分佈會較均勻，使頻寬會更寬。
- 14、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，該半導體光電元件係為半導體光放大器、高功率二極體、雷射等光電元件，且適用於光通訊系統發光頻寬之三五族者。
- 15、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，該不同分離局限異質結構的半導體係由三五族元素所組合，並可包含兩種或以上的元素成份。
- 16、如申請專利範圍第 1 項所述之方法，其中，該多層量子井結構組成的半導體材質係選自二六族元素、三五族元素及第四族元素的至少其中之一，並可包含兩種或以上的元素成份。



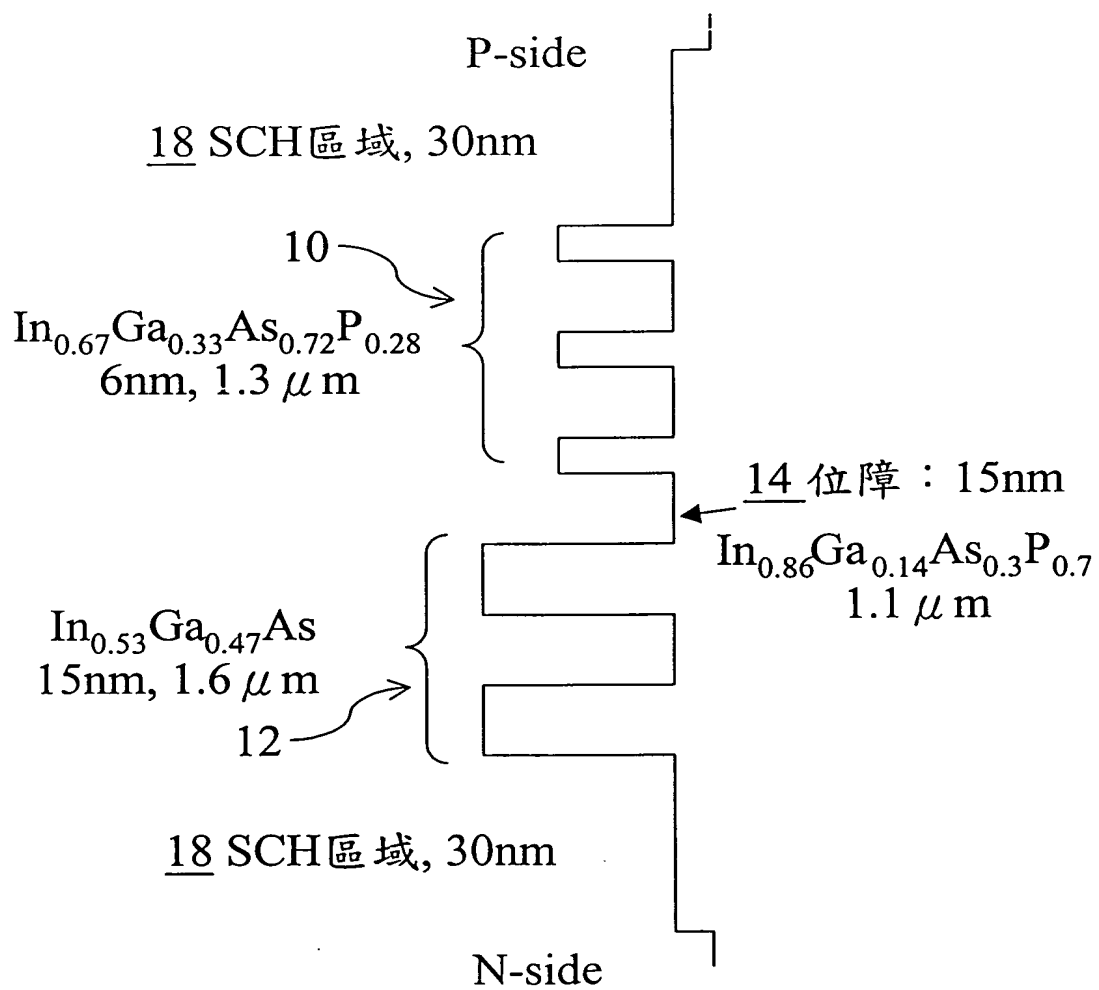
第一圖



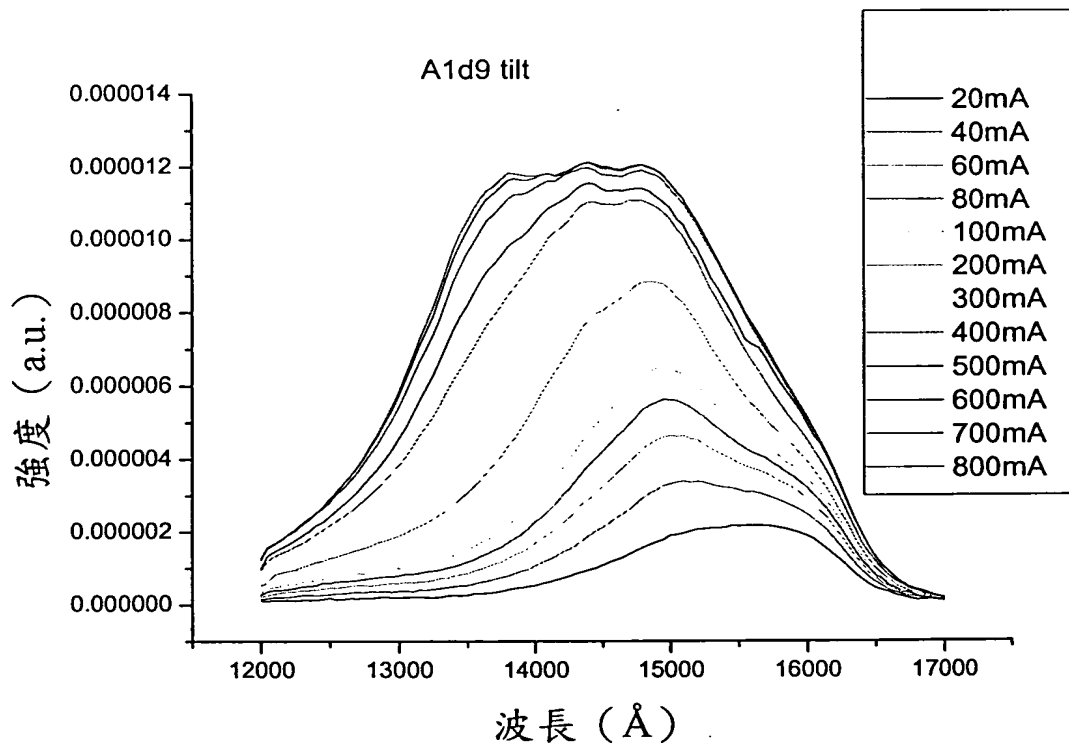
第二圖



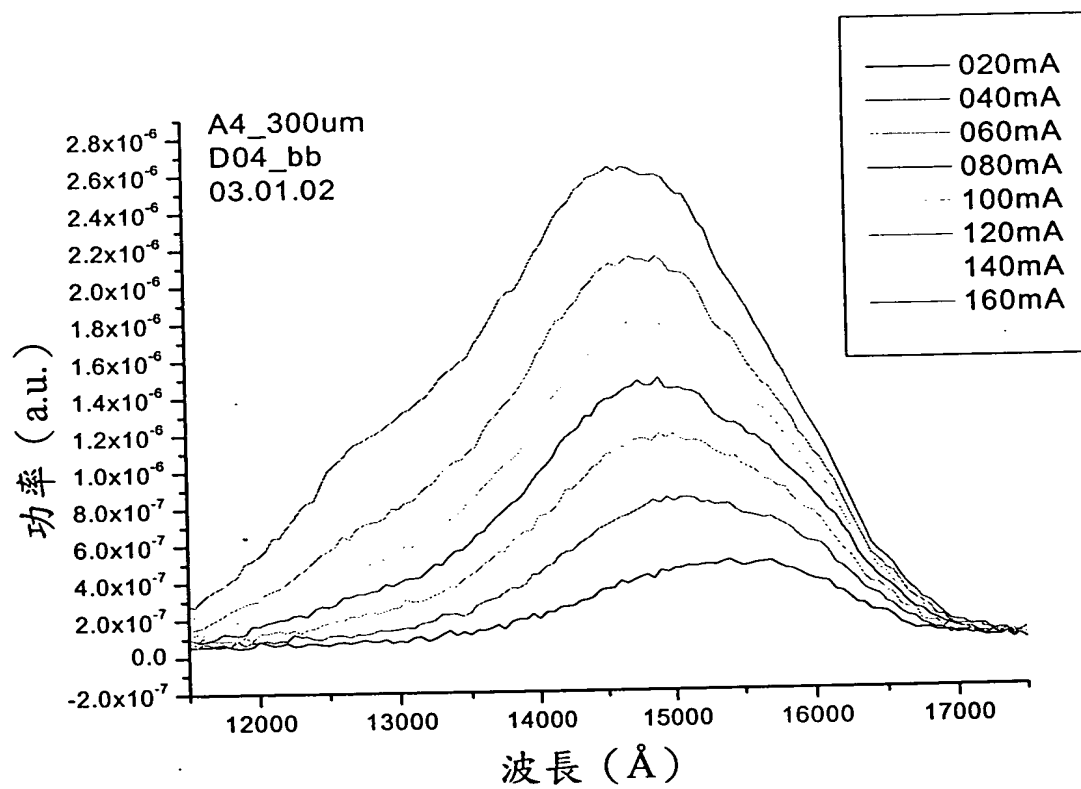
第三圖



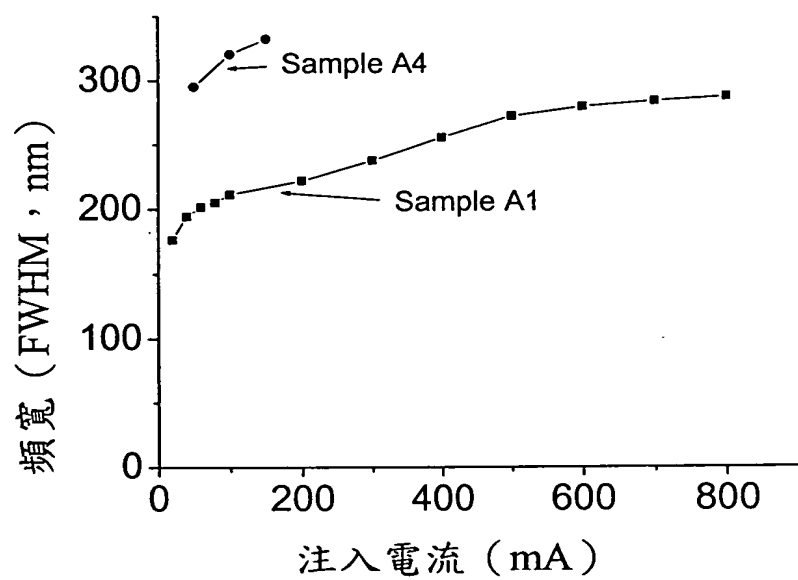
第四圖



第五圖



第六圖



第七圖